(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
30 octobre 2014 (30.10.2014)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2014/173954 A2

(51) Classification internationale des brevets :
H02P 9/48 (2006.01) *H02K 47/02* (2006.01)
H02M 7/06 (2006.01) *H02K 21/00* (2006.01)
H02M 1/42 (2007.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2014/058244

(22) Date de dépôt international :
23 avril 2014 (23.04.2014)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
13 53839 26 avril 2013 (26.04.2013) FR

(71) Déposant : **ALSTOM TECHNOLOGY LTD** [CH/CH]; Brown Boveri Strasse 7, CH-5400 Baden (CH).

(72) Inventeur : **GARCIA SOTO, Guillermo**; 2A rue la Pérouse, F-91300 Massy (FR).

(74) Mandataire : **AHNER, Philippe**; Brevalex, 95, rue d'Amsterdam, F-75378 Paris Cedex 8 (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) **Title** : AC/DC CONVERTER FOR CONTROLLING A SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS

(54) **Titre** : CONVERTISSEUR ALTERNATIF-CONTINU DE PILOTAGE D'UN GÉNÉRATEUR SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

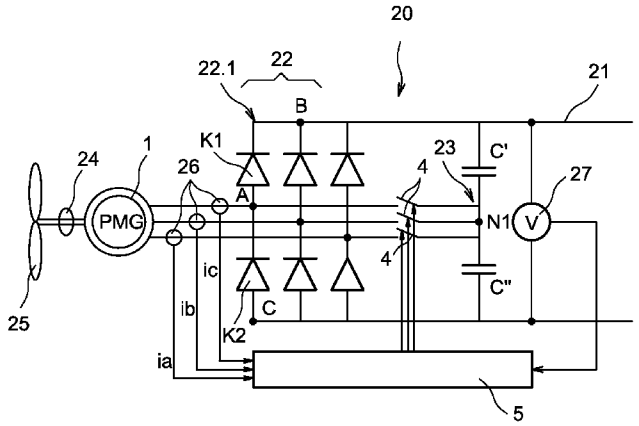

FIG. 2A1

(57) **Abstract** : An AC/DC converter intended to be connected, on the AC side, to a synchronous generator with permanent magnets (1), and to deliver DC voltage (V), comprising: a rectifier bridge (22, 32) with a plurality of cells (22.1, 32.1) with two arms (E1, E2) having two end terminals (B, C) and one middle terminal (A) to be connected to the generator; a pair (23) of power storage devices (C', C") in series, mounted at the end terminals (B, C), on the DC side, having a common node (N1); as many bidirectional switch devices (4) as there are cells (22.1, 32.1), each one mounted between a cell (22.1, 32.1) and the common node (N1); means (5) for controlling the vectors of the switch devices, for receiving the speed (q) of the rotor, the current (ia, ib, ic) to be injected into the converter and the direct voltage (V), intended to activate each switch device (4), in such a way that the current (ia, ib, ic) and the voltage (ua, ub, uc) applied to the converter are in phase.

(57) **Abrégé** :

[Suite sur la page suivante]

WO 2014/173954 A2

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g))*

Convertisseur alternatif-continu destiné à être relié, côté alternatif, à un générateur synchrone à aimants permanents (1) et, à délivrer une tension continue(V), comportant: un pont redresseur (22, 32) avec plusieurs cellules (22.1, 32.1) à deux bras (E1, E2) ayant deux bornes extrêmes (B, C) et une borne milieu (A) à connecter au générateur; une paire (23) de dispositifs de stockage d'énergie (C', C") en série, montés aux bornes extrêmes (B, C), côté continu,possédant un nœud commun (N1); autant de dispositifs interrupteurs bidirectionnels (4) que de cellules(22.1, 32.1), chacun monté entre une cellule (22.1, 32.1) et le nœud commun(N1); des moyens de commande vectorielle (5) des dispositifs interrupteurs,devant recevoir la vitesse (q) du rotor, le courant (ia, ib, ic) à injecter dans le convertisseur et la tension continue (V), destinés à activer chaque dispositif interrupteur (4),de manière à ce que le courant (ia, ib, ic) et la tension appliquée(ua, ub, uc) au convertisseur soient en phase.

CONVERTISSEUR ALTERNATIF-CONTINU DE PILOTAGE D'UN GÉNÉRATEUR SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne le domaine de la génération d'énergie électrique à partir de générateurs synchrones à aimants permanents connus par le sigle PMG. Dans ces générateurs, le champ d'excitation est fourni par un aimant permanent au lieu d'une bobine.

Elle s'applique dans le domaine l'énergie, aussi bien aux aérogénérateurs, qu'aux hydrogénérateurs, au domaine de l'aéronautique pour transformer de l'énergie cinétique en énergie électrique. D'autres domaines sont bien sûr envisageables comme les turbines à vapeur ou à gaz.

Le générateur peut être relié à un réseau à courant continu et le convertisseur alternatif-continu assure un redressement et une régulation côté continu.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

On connait plusieurs articles qui traitent d'aérogénérateurs à générateurs synchrones à aimants permanents. Parmi ceux-ci les documents numérotés [1], [2], [3], [4], sont référencés de manière complète en dernière page de la description.

Les documents [1] et [4] préconisent de d'utiliser, en tant que convertisseur alternatif-continu, un simple pont redresseur passif à diodes

branché en sortie du générateur synchrone à aimants permanents comme illustré sur la figure 1A.

Le générateur synchrone à aimants permanents 1 débite en sortie dans un pont redresseur à diodes 11 comportant plusieurs cellules de commutation 1.1 montées en parallèle. On prévoit deux cellules de commutation 1.1 si le générateur synchrone 1 est monophasé et autant de cellules de commutation 1.1 que de phases s'il est multiphasé. Dans l'exemple représenté non limitatif, le générateur synchrone à aimants permanents 1 est triphasé et il y a trois cellules de commutation 1.1. Chaque cellule de commutation 1.1 comporte deux bras, chacun comprenant une diode D1, D2, les deux diodes D1, D2 d'une cellule étant montées en série et en opposition. Chaque cellule de commutation 1.1 comporte deux bornes extrêmes B, C de part et d'autre des diodes D1, D2. La borne B est de polarité positive et la borne C de polarité négative. Chaque cellule de commutation 1.1 comporte une borne commune A entre ses deux diodes D1, D2 montées en série, appelée borne milieu. Chacune des cellules de commutation 1.1 est reliée au stator du générateur synchrone 1, cette liaison se fait à la borne milieu A.

Un dispositif de stockage d'énergie C1 est monté, côté continu du pont redresseur entre les bornes extrêmes B et C.

Les inconvénients de ce montage sont les suivants. Il ne permet pas de compenser la réactance du générateur synchrone 1, ce qui fait que la puissance fournie par le générateur synchrone 1 n'est pas optimale. De plus, puisque la tension fournie par le

générateur synchrone 1 dépend de sa vitesse de rotation, la tension aux bornes du dispositif de stockage d'énergie C1 n'est pas constante.

Encore un autre inconvénient est que le courant de phase du générateur synchrone est entaché de composantes harmoniques de bas rang, 3, 5, 7, 11 par exemple, provoquant des harmoniques de couple et du stress à la partie mécanique du générateur synchrone.

Les documents [2] et [4] préconisent l'utilisation en sortie du générateur synchrone à aimants permanents 1 d'un convertisseur alternatif-continu formé d'un pont redresseur à diodes 11, d'un dispositif de stockage d'énergie C1 monté aux bornes du pont redresseur à diodes 11 comme illustrés sur la figure 1A, et de plus, d'un étage élévateur 12 de type boost qui est branché aux bornes du dispositif de stockage d'énergie C1.

On peut se référer à la figure 1B. L'étage élévateur 12 de type boost comporte aux bornes du dispositif de stockage d'énergie C1 une association série d'une inductance L et d'un interrupteur K commandé par un signal S. En parallèle avec l'interrupteur K, est branchée une diode D3 dont l'anode est connectée à un point milieu E entre l'inductance L et l'interrupteur K et dont la cathode est connectée à une première borne d'un second dispositif de stockage d'énergie C2. La seconde borne du second dispositif de stockage d'énergie C2 est connectée à l'interrupteur K à l'opposé du point milieu E. La tension continue délivrée par le convertisseur alternatif-continu est prise aux bornes du second

dispositif de stockage d'énergie C2. L'interrupteur K est commandé par le signal S en ouverture et en fermeture.

Le convertisseur alternatif-continu de la figure 1B permet d'effectuer un pilotage synchrone du générateur synchrone à aimants permanents 1, ce qui fait que la tension de sortie continue prélevée aux bornes du second dispositif de stockage d'énergie C2 est sensiblement constante, mais le problème lié aux harmoniques évoqué plus haut subsiste.

Les pertes en puissance sont importantes liées notamment à l'étage élévateur 12 de type boost. Le rendement de l'ensemble n'est donc pas fameux.

Le document [3] préconise l'utilisation en sortie du générateur synchrone à aimants permanents 1 d'un convertisseur alternatif-continu formé d'un pont redresseur actif 13 ayant plusieurs cellules de commutation 13.1 montées en parallèle.

Chaque cellule de commutation 13.1 comporte deux bras comportant chacun un interrupteur à semi-conducteur commandé I1, I2, tel un transistor IGBT ou un thyristor IGCT par exemple, chacun des interrupteurs à semi-conducteur I1, I2 étant monté avec une diode roue libre D1', D2' en antiparallèle. Les ensembles interrupteurs à semi-conducteur, diodes d'une cellule de commutation sont montés en série.

Chaque cellule de commutation 13.1 comporte une borne commune A entre ses deux diodes D1', D2' montées en série, appelée borne milieu. Chacune des cellules de commutation 13.1 est reliée au générateur synchrone 1, cette liaison se fait à la borne milieu A

entre les deux bras. Le pilotage des interrupteurs à semi-conducteur des cellules se fait par commande vectorielle avec une modulation en largeur d'impulsion à deux niveaux puisque les deux interrupteurs d'une même cellule sont toujours commandés en opposition.

Cette configuration apporte beaucoup de pertes dues à la commutation des six interrupteurs à semi-conducteur. Les pertes sont proportionnelles à la tension présente côté continu. De plus, le taux de variation de tension en sortie du générateur synchrone est proportionnel à tension présente côté continu, ce qui engendre beaucoup de stress diélectrique dans le générateur. Elle n'est pas satisfaisante.

Le document [5] décrit un convertisseur alternatif-continu destiné à être relié, côté alternatif, à une source de tension alternative triphasée. Il permet de réduire les harmoniques. Il comporte un pont redresseur formé de plusieurs cellules de commutation montées en parallèle, chacune ayant deux diodes montées en série en opposition. Des inductances de valeurs élevées sont montées entre la source de tension alternative et le pont redresseur. Elles génèrent des pertes importantes et dégradent le rendement du convertisseur. Des capteurs de tension prélèvent la tension en amont des inductances, cette information est utilisée, via un transformateur, pour commander des interrupteurs montés chacun entre un point milieu entre deux diodes d'une même cellule de commutation du pont redresseur et un point milieu entre une paire de dispositifs de dispositif de stockage d'énergie connectés en série, cette paire de

dispositifs de dispositif de stockage d'énergie étant montée en parallèle avec les cellules de commutation. Ce convertisseur alternatif-continu ne convient pas pour être utilisé avec un générateur synchrone à aimants permanents susceptible de fonctionner à vitesse variable comme dans les applications d'aérogénérateurs ou d'hydrogénérateurs.

Il ne pourrait pas fournir une tension continue constante quelle que soit la vitesse de rotation du rotor du générateur synchrone à aimants permanents.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

La présente invention a pour but de proposer un convertisseur alternatif-continu pour générateur synchrone à aimants permanents susceptible de tourner à vitesse variable, permettant d'obtenir un rendement énergétique amélioré et ne présentant pas les inconvénients listés ci-dessus.

Un but de l'invention est donc de fournir un convertisseur alternatif-continu destiné fournir une tension sensiblement constante quelle que soit la vitesse de rotation du rotor du générateur synchrone à aimants permanents débitant dans le convertisseur alternatif-continu.

Un autre but de l'invention est donc de proposer un convertisseur alternatif-continu pour générateur synchrone à aimants permanents dont les pertes par commutation sont réduites par à rapport à celles obtenues avec un pont redresseur actif comme illustré sur la figure 1C.

Encore un autre but de l'invention est de proposer un convertisseur alternatif-continu pour générateur synchrone à aimants permanents qui permet de compenser la réactance du générateur et d'obtenir un meilleur facteur de puissance.

Encore un autre but de l'invention est de proposer un convertisseur alternatif-continu pour générateur synchrone à aimants permanents qui permet d'obtenir une réduction par deux du taux de variation de tension en sortie du générateur synchrone par rapport à celui obtenu avec les convertisseurs décrits aux figures 1B, 1C.

Pour y parvenir la présente invention propose d'utiliser un convertisseur alternatif-continu actif piloté par commande vectorielle basée sur le générateur synchrone à aimants permanents. Cela permet d'imposer, lorsque les moyens de commande vectorielle activent le dispositif interrupteur bidirectionnel du convertisseur alternatif-continu, que le courant injecté dans le convertisseur et la tension appliquée, côté alternatif, au convertisseur soient en phase. Ainsi la tension du générateur synchrone à aimants permanents est colinéaire à la force électromotrice et l'efficacité du générateur synchrone à aimants permanents est améliorée quelle que soit la vitesse de son rotor.

Plus particulièrement, la présente invention concerne un convertisseur alternatif-continu destiné à être relié, côté alternatif, à un générateur synchrone à aimants permanents et, à délivrer de l'autre côté une tension continue. Il comporte :

un pont redresseur pourvu de plusieurs cellules de commutation à deux bras ayant deux bornes extrêmes et une borne milieu entre les deux bras destinée à être connectée au générateur synchrone,

deux dispositifs de stockage d'énergie en série, montés aux bornes extrêmes du pont redresseur, côté continu, ces deux dispositifs de stockage d'énergie possédant un nœud commun,

autant de dispositifs interrupteurs bidirectionnels que de cellules, chacun monté entre une cellule et le nœud commun,

des moyens de commande vectorielle des dispositifs interrupteurs bidirectionnels destinés à recevoir une information représentative de la vitesse de rotation du rotor du générateur synchrone, une information représentative du courant devant être injecté dans le convertisseur par le générateur et une information représentative de la tension continue et destinés à activer chaque dispositif interrupteur bidirectionnel pour le rendre alternativement passant et bloqué de manière à ce que le courant injecté dans le convertisseur et la tension appliquée, côté alternatif, au convertisseur soient en phase ou pratiquement en phase de telle sorte que le générateur génère un courant de couple et pas ou quasiment pas de courant de flux.

Il est préférable pour limiter les pertes que les moyens de commande vectorielle activent chaque dispositif interrupteur bidirectionnel pour le rendre alternativement passant et bloqué tant que le courant injecté dans le convertisseur est inférieur à

sensiblement 90% du courant nominal du convertisseur et maintienne bloqué chaque dispositif interrupteur bidirectionnel dès que le courant injecté dans le convertisseur a atteint sensiblement 90% du courant nominal du convertisseur.

Dans une configuration adaptée aux basses tensions continues, le dispositif interrupteur bidirectionnel est relié à la borne milieu d'une cellule.

Chaque dispositif interrupteur bidirectionnel peut alors comporter deux interrupteurs monodirectionnels aptes à être commandés à l'allumage et au blocage, en série tête-bêche et deux diodes en série tête-bêche, chaque diode étant montée en antiparallèle avec un des interrupteurs.

Dans une configuration adaptée pour les moyennes tensions continues, chaque bras du pont redresseur possède un point milieu et chaque dispositif interrupteur bidirectionnel possède deux interrupteurs bidirectionnels en série ayant un point commun, l'un étant monté entre le point milieu d'un bras d'une cellule et le point commun et l'autre entre point milieu de l'autre bras de la même cellule de l'autre bras et le point commun, ce point commun étant relié au nœud commun des dispositifs de stockage d'énergie.

Chaque interrupteur bidirectionnel comporte deux interrupteurs monodirectionnels aptes à être commandés à l'allumage et au blocage, en série dans le même sens et deux diodes en série tête-bêche, l'une des diodes étant montée en antiparallèle avec un des

interrupteurs et l'autre en parallèle avec l'autre interrupteur.

Les interrupteurs monodirectionnels peuvent être des transistors IGBT, des transistors MOSFET, des thyristors IGCT.

Le dispositif de stockage d'énergie peut être un condensateur, une batterie ou une source de tension continue.

Chaque bras comporte avantageusement une ou plusieurs diodes montées en série.

Les moyens de commande vectorielle peuvent comprendre une unité de commande vectorielle incluant une unité de modulation en largeur d'impulsion à trois niveaux délivrant des signaux de commande des dispositifs interrupteurs bidirectionnels et une unité d'inhibition qui coopère avec l'unité de commande vectorielle.

L'unité de commande vectorielle peut comporter :

un premier comparateur destiné à comparer l'information représentative de la tension continue à une information représentative d'une tension continue de référence et à délivrer un résultat d'une première comparaison ;

un bloc de transformation de Park destiné à recevoir l'information représentative de la position du rotor du générateur et l'information représentative du courant injecté dans le convertisseur et à transformer cette information représentative du courant injecté en une information représentative d'un courant de couple

et une information représentative d'un courant de flux du générateur ;

un correcteur de tension destiné à recevoir le résultat de la première comparaison et à délivrer un signal représentatif d'un courant de couple de référence ;

un second comparateur destiné à comparer le signal représentatif du courant de couple de référence avec l'information représentative du courant de couple et à délivrer un résultat d'une seconde comparaison ;

un premier correcteur de courant destiné à recevoir le résultat de la seconde comparaison et à délivrer un signal représentatif d'une tension de couple de consigne ;

un troisième comparateur destiné à comparer l'information représentative du courant de flux avec un signal représentatif du courant de flux de référence et à délivrer un résultat d'une troisième comparaison ;

un second correcteur de courant destiné à recevoir le résultat de la troisième comparaison et à délivrer un signal représentatif d'une tension de flux de consigne ;

un bloc de transformation inverse de Park destiné à recevoir l'information représentative de la position du rotor du générateur synchrone, le signal représentatif de la tension de flux de consigne et le signal représentatif de la tension de couple de consigne et à transformer ces signaux en une information représentative d'une tension de consigne à appliquer au convertisseur côté alternatif, l'unité de

modulation en largeur d'impulsion recevant en entrée cette information.

Le signal représentatif du courant de flux de référence est forcé à zéro pour réduire encore les pertes.

Le convertisseur comporte, de préférence, de plus, une unité d'inhibition destinée à recevoir en entrée l'information représentative de la position du rotor du générateur synchrone et l'information représentative du courant de couple et à produire un signal d'inhibition pour l'unité de modulation en largeur d'impulsion uniquement lorsque le courant injecté dans le convertisseur a atteint sensiblement 90% du courant nominal du convertisseur.

On peut prévoir en outre un filtre RC par cellule ayant une extrémité reliée à la borne milieu et l'autre extrémité destinée à être portée à un potentiel flottant, destiné rendre moins raides les fronts de tension appliquée au convertisseur côté alternatif. On réduit ainsi le risque d'endommager les parties isolantes du générateur.

La présente invention concerne également une chaîne de conversion d'énergie comportant un générateur synchrone à aimant permanents couplé à un convertisseur alternatif-continu ainsi caractérisé, le générateur synchrone étant destiné à débiter dans le convertisseur alternatif-continu.

Cette chaîne peut être de type aérogénérateur ou hydrogénérateur.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

Les figures 1A, 1B, 1C déjà décrites montrent des schémas de convertisseurs alternatif-continu de pilotage de générateurs synchrones à aimants permanents de l'art antérieur ;

Les figures 2A1, 2A2 illustrent un exemple de chaîne de conversion d'énergie objet de l'invention, notamment de type aérogénérateur ou hydrogénérateur respectivement triphasé et monophasé, avec convertisseur alternatif-continu selon l'invention en version basse tension ;

La figure 2B illustre un exemple de dispositif interrupteur bidirectionnel du convertisseur des figures 2A1, 2A2 ;

La figure 3A illustre, dans une chaîne de conversion d'énergie notamment de type aérogénérateur ou hydrogénérateur objet de l'invention, un autre exemple de schéma de convertisseur alternatif-continu selon l'invention en version moyenne tension et la figure 3B illustre un exemple de dispositif interrupteur bidirectionnel;

La figure 4A montre un exemple des moyens de commande vectorielle des dispositifs interrupteurs bidirectionnels en version triphasée et la figure 4B un exemple des moyens de commande vectorielle des

dispositifs interrupteurs bidirectionnels en version monophasée ;

La figure 5A montre un chronogramme représentant le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu en fonction du temps et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI des dispositifs interrupteurs bidirectionnels dans le cas où le courant injecté est supérieur à environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu ;

la figure 5B montre un chronogramme représentant le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu en fonction du temps et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI des dispositifs interrupteurs bidirectionnels dans le cas où le courant de phase est inférieur à environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu ;

les figures 5C et 5D montrent respectivement l'allure de la variation de tension appliquée à la borne commune A et celle du courant circulant dans le dispositif interrupteur bidirectionnel de la figure 2B lors de la commande du dispositif interrupteur bidirectionnel.

Des parties identiques, similaires ou équivalentes des différentes figures portent les mêmes références numériques de façon à faciliter le passage d'une figure à l'autre.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

On va s'intéresser aux figures 2A1, 2A2 qui montrent deux exemples de schéma électrique du convertisseur alternatif-continu 20 objet de

l'invention. Le convertisseur alternatif-continu 20 est multiphasé (ici triphasé) sur la figure 2A1 et monophasé sur la figure 2A2. Un générateur synchrone à aimants permanents 1 est destiné à être branché d'un côté alternatif du convertisseur alternatif-continu. Il est destiné à être relié côté continu à un bus à courant continu 21. Ce bus à courant continu 21 peut alimenter un dispositif utilisateur (non représenté).

Le convertisseur alternatif-continu 20 est formé d'un pont redresseur 22 comportant plusieurs cellules de commutation 22.1 montées en parallèle. Comme explicité plus haut, on prévoit deux cellules de commutation 22.1 si le convertisseur alternatif-continu 20 est monophasé et autant de cellules de commutation 22.1 que de phases s'il est multiphasé. Chaque cellule de commutation 22.1 comporte, dans cet exemple approprié pour des tensions basses deux interrupteurs K1, K2 montés en série et en opposition. Chaque cellule de commutation 22.1 comporte deux bornes extrêmes B, C de part et d'autre des interrupteurs K1, K2. La borne B est de polarité positive et la borne C de polarité négative. Chaque cellule de commutation 22.1 comporte une borne commune A entre ses deux interrupteurs K1, K2 montés en série, appelée borne milieu. Les interrupteurs K1, K2 sont des interrupteurs à commutation naturelle comme des diodes.

Chacune des cellules de commutation 22.1 est reliée au stator du générateur synchrone à aimants permanents 1, cette liaison se fait de préférence directement à la borne milieu A. Il n'y a pas d'inductance comme illustré dans le document [5].

Le dispositif de conversion alternatif-continu 20 objet de l'invention comporte de plus, côté continu, une paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C'' agencés en série. La paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C'' est montée en parallèle avec les cellules de commutation 22.1, entre les bornes extrêmes B et C. Le bus à courant continu 21 est branché aux bornes de la paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C''. Les deux dispositifs de stockage d'énergie C', C'' comportent un nœud commun N1. Chaque dispositif de stockage d'énergie C', C'' peut être un condensateur, une batterie ou une source de tension continue. Le convertisseur alternatif-continu comporte, en outre, de préférence un filtre RC 28 (connu sous la dénomination filtre dV/dt) associé à chacune des cellules de commutation du pont redresseur, branché par une extrémité à la borne milieu A et dont l'autre extrémité est portée à un potentiel flottant. Il assure une protection du générateur synchrone à aimants permanent 1, en lui imposant moins de stress diélectrique. La raideur des fronts de tension appliquée côté alternatif au convertisseur alternatif-continu est réduite.

Ce filtre RC 28 n'a été illustré que sur la figure 2B et pas sur les figures 2A1, 2A2 pour ne pas les surcharger inutilement.

Le dispositif de conversion alternatif-continu, objet de l'invention, comporte en outre un dispositif interrupteur bidirectionnel 4 associé à chaque cellule de commutation 22.1. Il est monté entre la cellule de commutation 22.1 associée et le nœud N1

commun aux deux dispositifs de stockage d'énergie C', C'' de la paire 12. Plus particulièrement dans cet exemple de la figure 2A, le dispositif interrupteur bidirectionnel 4 est monté entre la borne commune A et le nœud commun N1.

Ces dispositifs interrupteurs bidirectionnels 4 comportent possèdent deux états, ils sont soit dans un état passant, soit dans un état bloqué.

Chaque dispositif interrupteur bidirectionnel 4 comporte, comme illustré sur la figure 2B, au moins deux interrupteurs qui sont associés à des moyens de commande 5 qui vont en fonctionnement, les activer c'est-à-dire les faire passer de l'état passant à l'état bloqué alternativement, soit les maintenir bloqués. On décrira plus en détails sur les figures 2B et 3B les dispositifs interrupteurs bidirectionnels.

Ces moyens de commande 5 sont des moyens de commande vectorielle. La commande vectorielle des dispositifs interrupteurs bidirectionnels va se faire par modulation de largeur d'impulsion MLI à trois niveaux. On verra plus loin en détails la structure des moyens de commande vectorielle 5.

On prévoit que les moyens de commande vectorielle 5 reçoivent une information représentative de la position θ du rotor du générateur synchrone à aimants permanents 1. Un capteur de position référencé 24 peut délivrer cette information, il peut capter la position de l'arbre reliant le rotor du générateur synchrone à aimants permanents 1 au moyeu qui relie les pales 25 de l'éolienne ou de l'hydrolienne au rotor du

générateur synchrone à aimants permanents 1. Ces pales sont référencées 25 sur la figure 2A.

Les moyens de commande vectorielle 5 reçoivent également une information représentative du courant en sortie du générateur synchrone à aimants permanents 1 et injecté dans le convertisseur alternatif-continu 20. Dans le cas d'un générateur synchrone à aimants permanents 1 triphasé, le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu correspond aux trois courants de phase appelés conventionnellement ia, ib, ic. On prévoit un capteur de courant mesurant chacun, un des courants de phase ia, ib, ic. Les capteurs de courant sont référencés 26. Les moyens de commande vectorielle 5 reçoivent également une information représentative de la tension continue V présente, en fonctionnement, côté continu du convertisseur alternatif-continu 20. On prévoit un capteur de tension référencé 27 branché aux bornes de la paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C''.

Il est possible de mesurer les tensions ua, ub, uc qui sont les tensions entre phase dans le but d'améliorer l'estimation de la position du rotor si on utilise un algorithme à la place d'un capteur de position.

Dans le cas d'un générateur monophasé, le courant mesuré est le courant statorique i délivré par le générateur.

La figure 2B ne représente qu'un seul dispositif interrupteur bidirectionnel 4 des variantes illustrées sur les figures 2A1, 2A2 associé à une

cellule de commutation 22.1 du pont redresseur. Le dispositif interrupteur bidirectionnel 4 comporte deux interrupteurs bidirectionnels S1, S2 montés en série. Chaque interrupteur bidirectionnel S1 ou S2 comporte un transistor IG1, IG2 et les deux transistors sont tête-bêche. Ces transistors sont représentés comme des transistors IGBT. Dans cet exemple, ils ont un nœud commun N2 d'émetteur, appelé aussi nœud commun N2 du dispositif interrupteur bidirectionnel 4. Le nœud commun N1 de la paire de dispositifs de stockage d'énergie 23 est connecté au collecteur d'un des transistors IG2 et la borne milieu A est connectée au collecteur de l'autre transistor IG1. Chaque interrupteur bidirectionnel S1, S2 comporte également une diode de roue libre DG1, DG2, les deux diodes DG1, DG2 sont montées en série également tête-bêche. Chaque diode DG1, DG2 est associée à un transistor IG1, IG2. Ce montage en série tête-bêche est tel que leurs anodes soient reliées entre elles et au nœud commun N2 du dispositif interrupteur bidirectionnel 4. L'émetteur de chacun des transistors IG1, IG2 est connecté à son collecteur respectif par une diode de roue libre respective DG1, DG2. Chaque diode de roue libre DG1, DG2 est ainsi montée en antiparallèle entre l'émetteur et le collecteur de son transistor associé.

Le transistor IG1 et la diode DG1 sont en antiparallèle et le transistor IG2 et la diode DG2 sont en antiparallèle alors que le transistor IG1 et la diode DG2 sont opposés et le transistor IG2 et la diode DG1 sont opposés.

Les moyens de commande vectorielle 5 du dispositif interrupteur bidirectionnel 4 sont connectés à la grille de chacun des transistors IG1, IG2 ainsi qu'au nœud commun N2 du dispositif l'interrupteur bidirectionnel 4.

Lorsque le dispositif interrupteur bidirectionnel 4 est activé par les moyens de commande vectorielle 5 qui lui sont associés, il est rendu alternativement passant et bloqué. La commande vectorielle est de préférence une commande par modulation de largeur d'impulsion MLI. Quand il n'est pas passant, il est bloqué. Lorsque le dispositif interrupteur bidirectionnel 4 est passant, seul le transistor IG1 de l'interrupteur bidirectionnel S1 est passant ainsi que la diode DG2 qui lui est opposée. Lorsque l'interrupteur bidirectionnel S1 est passant du courant délivré par le générateur synchrone à aimants permanents 1 se déverse dans la paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C''. Les interrupteurs bidirectionnels S1 et S2 ne sont pas actionnés de manière complémentaire strictement. Lorsque le dispositif interrupteur bidirectionnel 4 est activé seul un des transistors IG1 et IG2 est rendu alternativement passant et bloqué, et l'autre est bloqué ou ils sont tous les deux bloqués en fin de cycle d'activation de l'un et avant un cycle d'activation de l'autre.

Sur la figure 3A, on a représenté une variante du convertisseur alternatif-continu 20 qui est adapté pour des moyennes tensions continues alors que les convertisseurs des figures 2A1, 2A2 étaient adaptés

pour des plus basses tensions continues. Dans ce contexte, par moyenne tension on entend des tensions supérieures à environ 1000 VDC, alors que les basses tensions sont inférieures à environ 1000 VDC.

Le convertisseur alternatif-continu 20 comporte un pont redresseur 32 avec plusieurs cellules de commutation 32.1 montées en parallèle. Chaque cellule de commutation comporte deux bras E1, E2 reliés par la borne milieu A. Chaque bras est un ensemble série de deux ou d'un nombre pair d'interrupteurs K11, K12, K21, K22 monodirectionnels, les interrupteurs d'un bras sont en opposition avec ceux de l'autre bras. Chaque bras E1, E2 possède un point milieu A1, A2.

On a de nouveau indiqué les bornes extrêmes B, C et la borne milieu A. Les interrupteurs K11, K12, K21, K22 sont des interrupteurs à commutation naturelle comme des diodes.

Chacune des cellules de commutation 32.1 est reliée au stator du générateur synchrone à aimants permanents 1, cette liaison se fait à la borne milieu A.

Le convertisseur alternatif-continu 20 objet de l'invention comporte de plus, côté continu, la paire 23 de dispositifs de stockage d'énergie C', C'' agencés en série.

On prévoit également un dispositif interrupteur bidirectionnel 6 associé à chaque cellule de commutation 32.1. Chaque dispositif interrupteur bidirectionnel 4 comporte deux interrupteurs bidirectionnels S1, S2 montés en série dans le même sens. L'un des interrupteurs bidirectionnels appelé S1

est disposé entre le nœud N1 commun aux deux dispositifs de stockage d'énergie C', C'' de la paire 12 de dispositifs de stockage d'énergie et le point milieu A1 d'un bras E1 de l'une des cellules de commutation 32.1 du pont redresseur. L'autre interrupteur bidirectionnel S2 est disposé entre le nœud N1 commun et le point milieu A2 de l'autre bras E2 de la même cellule de commutation 32.1.

Chaque interrupteur bidirectionnel S1, S2 est associé bien entendu aux moyens de commande vectorielle 5 qui lorsqu'ils l'activeront, le mettront dans son état passant à partir de son état bloqué et vice versa. La commande des interrupteurs bidirectionnels va se faire par modulation de largeur d'impulsion MLI à trois niveaux. On verra plus loin en détails la structure des moyens de commande vectorielle 5.

Sur la figure 3A, on a représenté le dispositif d'interrupteur bidirectionnel 6 avec ses deux interrupteurs bidirectionnels S1, S2. Chaque interrupteur bidirectionnel S1, S2 comporte un transistor IG1, IG2, par exemple de type IGBT, et une diode de roue libre DG1, DG2 montée en antiparallèle entre l'émetteur et le collecteur de son transistor IGBT associé.

Les deux transistors IG1, IG2 sont montés en série dans le même sens, ils ont un nœud commun qui est le nœud commun N1 de la paire de dispositifs de stockage d'énergie. L'un des transistors, en l'occurrence IG2, a son collecteur relié au point milieu A2 du bras E2 et l'autre transistor IG1 a son

émetteur relié au point milieu A1 du bras E1. Les diodes DG1 et DG2 sont en série tête-bêche et leurs anodes sont reliées entre elles et au nœud commun N1. Leurs cathodes sont reliées pour l'une en l'occurrence DG2 au point milieu A2 et pour l'autre DG1 au point milieu A1. Le transistor IG1 et la diode DG1 sont en antiparallèle et le transistor IG2 et la diode DG2 sont opposés.

Les moyens de commande vectorielle 5 du dispositif interrupteur bidirectionnel sont connectés à la grille de chacun des transistors IG1, IG2. Lorsque le dispositif interrupteur bidirectionnel est activé seul un des transistors IG1 et IG2 est rendu alternativement passant et bloqué, et l'autre est bloqué ou ils sont tous les deux bloqués en fin de cycle d'activation de l'un et avant un cycle d'activation de l'autre.

Au lieu d'utiliser des transistors IGBT dans les interrupteurs bidirectionnels, on aurait pu utiliser des transistors MOSFET ou des thyristors IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). Plus généralement, on utilisera des interrupteurs monodirectionnels commandables à l'allumage et au blocage.

On va maintenant décrire un exemple des moyens de commande vectorielle 5 des dispositifs interrupteurs bidirectionnels 4, 6. Ces moyens de commande vectorielle 5, lorsqu'ils sont actifs et non inhibés, vont permettre d'activer chaque dispositif interrupteur bidirectionnel de manière à ce que la tension appliquée au convertisseur alternatif-continu

et le courant injecté par le générateur synchrone à aimants permanents dans le convertisseur alternatif-continu soient en phase ou pratiquement en phase de telle sorte que le générateur génère un courant de couple et pas ou quasiment pas de courant de flux.

Cela permet de compenser la réactance du générateur synchrone à aimants permanents.

Sur la figure 4A on a représenté un exemple de moyens de commande vectorielle 5, toujours dans l'exemple non limitatif d'un générateur synchrone à aimants permanents triphasé. Sur la figure 4B on a représenté un exemple de moyens de commande vectorielle 5, toujours dans l'exemple non limitatif d'un générateur synchrone à aimants permanents monophasé.

Ces moyens de commande vectorielle 5 comportent au moins une unité de commande vectorielle 50.

L'unité de commande vectorielle 50 comporte un premier comparateur 52 destiné à recevoir sur une entrée une information représentative de la tension continue V en sortie du convertisseur alternatif-continu mesurée par le capteur de tension 27 et sur une autre entrée une information représentative d'une tension de référence Vref. Il possède une sortie sur laquelle est présent le résultat d'une première comparaison. Cette sortie est reliée en entrée d'un correcteur de tension 53. Le correcteur de tension 53 peut être de type proportionnel intégral PI.

On prévoit dans l'unité de commande vectorielle 50, un bloc de transformation de Park 54 destiné à recevoir en entrée l'information

représentative du courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu. Il s'agit sur la figure 4A des courants de phase ia, ib, ic mesurés par les capteurs de courant 26.

Sur la figure 4B, il s'agit du courant statorique i. On injecte également dans le bloc de transformation de Park 54, un courant qui est en quadrature par rapport au courant statorique i. Un bloc de déphasage 61 de $\pi/2$ est prévu à cet effet. Ce bloc de transformation de Park 54 est destiné à recevoir également en entrée l'information représentative de la position θ du rotor du générateur synchrone 1 délivrée par le capteur de position 24. Ce bloc de transformation de Park 54 est destiné à transformer l'information représentative du courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu en une information représentative d'un courant de flux id et une information représentative d'un courant de couple iq. Les courants ia, ib, ic sont liés au référentiel du stator du générateur synchrone à aimants permanents 1. Ils sont sinusoïdaux. Il en est de même pour le courant statorique i. Les courants id et iq sont des courants constants selon un axe direct et un axe transverse respectivement.

Le correcteur de tension 53 délivre un signal représentatif d'un courant de couple de référence iqref. Le correcteur de tension 53 a une sortie reliée à une entrée d'un second comparateur 55 destinée à recevoir sur une autre entrée l'information représentative du courant de couple iq délivrée par le bloc de transformation de Park 54. Le second

comparateur 55 compare donc le signal représentatif du courant de couple de référence iqref avec l'information représentative du courant de couple iq délivrée par le bloc de transformation de Park 54. Il possède une sortie sur laquelle est présent le résultat d'une seconde comparaison. Cette sortie est reliée en entrée d'un premier correcteur de courant 56. Le premier correcteur de courant 56 est destiné à recevoir le résultat d'une seconde comparaison et à délivrer un signal représentatif d'une tension de couple uq de consigne.

L'unité de commande vectorielle 50 comporte, en outre, un troisième comparateur 57 destiné à recevoir sur une entrée l'information représentative du courant de flux id délivrée par le bloc de transformation de Park 54, sur une autre entrée un signal représentatif d'un courant de flux de référence idref. Ce courant de flux de référence idref est forcé à zéro pour minimiser les courants et les pertes Joule. Le second comparateur 57 compare donc le signal représentatif du courant de flux de référence idref = 0 avec l'information représentative du courant de flux id délivrée par le bloc de transformation de Park 54. Il possède une sortie sur laquelle est présent le résultat d'une troisième comparaison.

Cette sortie est reliée en entrée d'un second correcteur de courant 58. Le second correcteur de courant 58 est destiné à recevoir le résultat de la troisième comparaison.

Le second correcteur de courant 58 est destiné à délivrer un signal représentatif d'une

tension de flux ud de consigne. Le premier et le second correcteur de courant 56, 58 peuvent être de type proportionnel intégral PI.

Le premier et le second correcteur de courant 56, 58 sont reliés en sortie à l'entrée d'un bloc de transformation inverse de Park 59. Ce bloc de transformation inverse de Park 59 est destiné à recevoir le signal représentatif de la tension de flux de consigne ud et de la tension de couple de consigne uq. Ce bloc de transformation inverse de Park 59 reçoit également l'information représentative de la position θ du rotor du générateur synchrone délivrée par le capteur de position 24.

Ce bloc de transformation inverse de Park 59 permet de revenir à une information représentative d'une tension de consigne à appliquer, au convertisseur alternatif continu par le générateur synchrone, ce qui correspond dans le cas d'un générateur triphasé à des tensions entre phase de consigne ua, ub, uc, ce qui correspond aux composantes triphasées de la tension statorique. Elles correspondent à la tension appliquée côté alternatif du convertisseur alternatif-continu qui permettra d'extraire le maximum de puissance du générateur synchrone à aimants permanents. Dans le cas d'un générateur synchrone monophasé, le bloc de transformation inverse de Park 59 délivre deux tensions qui sont des composantes biphasées uα, uβ de la tension statorique.

L'information représentative de la tensions de consigne à appliquer au convertisseur synchrone est injectée dans une unité de modulation en largeur

d'impulsion 60 qui délivre des signaux en impulsion de commande à appliquer aux interrupteurs S1, S2 des dispositifs interrupteurs bidirectionnels 4, 6. On a schématisé à cet effet, six signaux de commande en sortie de l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60 et donc de l'unité de commande vectorielle 50.

Dans le cas du générateur synchrone triphasé, il s'agit des tensions de consigne ua, ub, uc.

Dans le cas du générateur synchrone monophasé, la tension de consigne uα est injectée dans l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60. L'autre tension de consigne uβ est forcée à zéro et cette valeur nulle est injectée dans l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60.

Les moyens de commande vectorielle 5 comportent en outre une unité d'inhibition 51 qui coopère avec l'unité de commande vectorielle 50.

Mais cette unité de modulation en largeur d'impulsion 60 est pilotée par l'unité d'inhibition 61. L'unité d'inhibition 61 est destinée à recevoir en entrée l'information représentative du courant de couple iq délivré par le bloc de transformation de Park 54 et l'information représentative de la position θ du rotor du générateur synchrone délivrée par le capteur de position 22. La sortie de l'unité d'inhibition 61 est reliée à l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60. Elle produit un signal d'inhibition pour l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60.

En effet, pour limiter drastiquement les pertes, ce signal d'inhibition n'est produit que

lorsque le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu atteint environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu et il bloque l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60. Le courant nominal du convertisseur alternatif-continu est le courant maximum que peut supporter le convertisseur alternatif-continu en régime permanent. Lorsque l'unité d'inhibition 51 bloque l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60 chaque dispositif interrupteur bidirectionnel 4 est maintenu bloqué.

Les pertes ne sont pas négligeables lorsque le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu est élevé, les pertes étant proportionnelles au courant. Les pertes liées à la commutation des interrupteurs bidirectionnels sont alors éliminées. Le courant continu en sortie du convertisseur alternatif-continu présente une faible ondulation, il est sensiblement constant.

Lorsque le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu est faible, les pertes sont négligeables et le courant continu en sortie du convertisseur alternatif-continu présente aussi une faible ondulation.

On a représenté sur les figures 5A et 5B, le traitement par les interrupteurs du convertisseur alternatif-continu du courant délivré par le générateur synchrone à aimants permanents. Ce courant correspond à un courant de phase dans le cas d'un générateur synchrone à aimants permanents multiphasé. Les impulsions délivrées par l'unité de modulation en largeur d'impulsion 60 sont illustrées par les bâtons.

Sur la figure 5A l'amplitude maximum du courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu dépasse environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu.

Dès que ce courant dépasse environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu, la modulation en largeur d'impulsion est inhibée. Les interrupteurs sont donc maintenus bloqués sur une plage temporelle sensiblement centrale d'une alternance du courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu. De part et d'autre de cette plage centrale, les interrupteurs sont donc activés en permanence et donc rendus alternativement passants et bloqués au rythme de la modulation en largeur d'impulsion.

Sur la figure 5B, l'amplitude maximum du courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu n'atteint pas environ 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu. Il n'y a pas d'inhibition de la modulation en largeur d'impulsion. Les interrupteurs sont donc activés en permanence et donc rendus alternativement passants et bloqués au rythme de la modulation en largeur d'impulsion.

Sur les figures 5C et 5D, on a illustré à titre d'exemple, dans le cas où le courant injecté dans le convertisseur alternatif-continu est inférieur à 90% du courant nominal, l'allure de la tension appliquée à la borne commune A convertisseur alternatif-continu et l'allure du courant circulant dans le dispositif interrupteur 4 tel que celui de la figure 2B. Dans un premier cycle correspondant à une alternance positive

du courant, c'est l'interrupteur monodirectionnel IG1 qui est activé par l'unité de modulation en largeur d'impulsion MLI le pour le faire passer alternativement d'un état bloqué à un état passant. L'interrupteur à monodirectionnel IG2 est bloqué. Dans un second cycle, correspondant à une alternance négative du courant, c'est l'interrupteur monodirectionnel IG2 qui est activé par l'unité de modulation en largeur d'impulsion MLI le pour le faire passer alternativement d'un état bloqué à un état passant. L'interrupteur à semi-conducteur IG1 est bloqué. Entre les deux cycles, les deux interrupteurs monodirectionnels IG1 et IG2 sont bloqués, le courant est sensiblement nul. Le courant issu du générateur synchrone passe à travers la cellule de commutation 22.1. La succession de ces deux cycles se poursuit tant que le courant reste inférieur à 90% du courant nominal du convertisseur alternatif-continu.

DOCUMENTS CITÉS

[1] Anders Grauers « Synchronous generator and frequency converter in wind turbine applications :system design and efficiency » Technical report No 175L, May 1994, Department of electrical machines and power electronics Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

[2] Belloni F. et al. « Permanent magnet wind generators : control strategies to manage voltage unbalances ». International Conference of renewable energy and power quality. Santiago de Compostela, 28th to 30th March 2012.

[3] O. B.k Hasnaoui et al.« direct drive permanent magnet synchronous generator wind turbine investigation ». Journal of Electrical Systems, vol. 4, Issue 3, September 2008.

[4] C.N. Bhende et al. "Permanent magnet synchronous generator-based standalone wind energy supply system » IEEE Transaction on sustainable energy", vol 2, N°4, October 2011.

[5] F. Daniel et al. « Three-phase diode rectifier with low harmonic distorsion to feed capacitive loads », IEEE 1996.

REVENDICATIONS

1. Convertisseur alternatif-continu destiné à être relié, côté alternatif, à un générateur synchrone à aimants permanents (1) et, à délivrer de l'autre côté une tension continue (V), comportant :

un pont redresseur (22, 32) pourvu de plusieurs cellules de commutation (22.1, 32.1) à deux bras (E1, E2) ayant deux bornes extrêmes (B, C) et une borne milieu (A) entre les deux bras destinée à être connectée au générateur synchrone,

une paire (23) de dispositifs de stockage d'énergie (C', C'') en série, montés aux bornes extrêmes (B, C) du pont redresseur, côté continu, ces deux dispositifs de stockage d'énergie possédant un nœud commun (N1),

autant de dispositifs interrupteurs bidirectionnels (4) que de cellules (22.1, 32.1), chacun monté entre une cellule (22.1, 32.1) et le nœud commun (N1),

des moyens de commande vectorielle (5) des dispositifs interrupteurs bidirectionnels, destinés à recevoir une information représentative de la vitesse de rotation (θ) du rotor du générateur, une information représentative du courant (ia, ib, ic, i) devant être injecté dans le convertisseur par le générateur et une information représentative de la tension continue (V) et destinés à activer chaque dispositif interrupteur bidirectionnel (4) pour le rendre alternativement passant et bloqué tant que le courant injecté (ia, ib, ic) dans le convertisseur est inférieur à sensiblement

90% du courant nominal du convertisseur et à le maintenir bloqué chaque dispositif interrupteur bidirectionnel (4) dès que le courant injecté (ia, ib, ic) dans le convertisseur a atteint sensiblement 90% du courant nominal du convertisseur, de manière à ce que le courant injecté (ia, ib, ic, i) dans le convertisseur et la tension appliquée (ua, ub, uc), côté alternatif, au convertisseur soient en phase ou pratiquement en phase de telle sorte que le générateur génère un courant de couple et pas ou quasiment pas de courant de flux.

2. Convertisseur alternatif-continu selon la revendication 1, dans lequel chaque dispositif interrupteur bidirectionnel (4) est relié à la borne milieu (A) d'une cellule (22.1, 32.1).

3. Convertisseur alternatif-continu selon la revendication 2, dans lequel chaque dispositif interrupteur bidirectionnel (4) comporte deux interrupteurs monodirectionnels (IG1, IG2) aptes à être commandés à l'allumage et au blocage en série tête-bêche et deux diodes en série (DG1, DG2) tête-bêche, chaque diode étant montée en antiparallèle avec un des interrupteurs.

4. Convertisseur alternatif-continu selon la revendication 1, dans lequel chaque bras (E1, E2) du pont redresseur (22, 32) possède un point milieu (A1, A2) et chaque dispositif interrupteur bidirectionnel (4) possède deux interrupteurs bidirectionnels (S1, S2)

en série ayant un point commun, l'un étant monté entre le point milieu (A1) d'un bras (E1) d'une cellule (32.1) et le point commun et l'autre étant monté entre point milieu (A2) de l'autre bras (E2) de la même cellule (32.1) et le point commun, ce point commun étant relié au nœud commun (N1) des dispositifs de stockage d'énergie (C', C'').

5. Convertisseur alternatif-continu selon la revendication 4, dans lequel chaque interrupteur bidirectionnel (S1, S2) comporte deux interrupteurs monodirectionnels (IG1, IG2) aptes à être commandés à l'allumage et au blocage en série dans le même sens et deux diodes (DG1, DG2) en série tête-bêche, l'une des diodes (DG1) étant montée en antiparallèle avec un des interrupteurs (IG1) et l'autre (DG2) en parallèle avec l'autre interrupteur (IG2).

6. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 3 ou 5, dans lequel les interrupteurs monodirectionnels sont des transistors IGBT, des transistors MOSFET, des thyristors IGCT.

7. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 1 à 6, dans lequel le dispositif de stockage d'énergie (C', C'') est un condensateur, une batterie ou une source de tension continue.

8. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel chaque bras

(E1, E2) comporte une ou plusieurs diodes (K1, K2, K11, K12, K21, K22) montées en série.

9. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 1 à **8**, dans lequel les moyens de commande vectorielle (5) comportent une unité de commande vectorielle (50) incluant une unité de modulation en largeur d'impulsion (60) à trois niveaux délivrant des signaux de commande des dispositifs interrupteurs bidirectionnels (4, 6) et une unité d'inhibition (51) qui coopère avec l'unité de commande vectorielle (50).

10. Convertisseur alternatif-continu selon la revendication 9, dans lequel l'unité de commande vectorielle (50) comporte :

un premier comparateur (52) destiné à comparer l'information représentative de la tension continue (V) à une information représentative d'une tension continue de référence (Vref) et à délivrer un résultat d'une première comparaison ;

un bloc de transformation de Park (54) destiné à recevoir l'information représentative de la position du rotor (θ) du générateur et l'information représentative du courant injecté (ia, ib, ic) dans le convertisseur et à transformer cette information représentative du courant injecté (ia, ib, ic) en une information représentative d'un courant de flux (id) et une information représentative d'un courant de couple (iq);

un correcteur de tension (53) destiné à recevoir le résultat de la première comparaison et à délivrer un signal représentatif d'un courant de couple de référence (iqref);

un second comparateur (55) destiné à comparer le signal représentatif du courant de couple de référence (iqref) avec l'information représentative du courant de couple (iq) et à délivrer un résultat d'une seconde comparaison ;

un premier correcteur de courant (56) destiné à recevoir le résultat de la seconde comparaison et à délivrer un signal représentatif d'une tension de couple de consigne (uq);

un troisième comparateur (57) destiné à comparer l'information représentative du courant de flux (id) avec un signal représentatif d'un courant de flux de référence (idref) et à délivrer un résultat d'une troisième comparaison ;

un second correcteur de courant (58) destiné à recevoir le résultat de la troisième comparaison et à délivrer un signal représentatif d'une tension de flux de consigne (ud);

un bloc de transformation inverse de Park (59) destiné à recevoir l'information représentative de la position du rotor (θ) du générateur synchrone, le signal représentatif de la tension de flux de consigne (ud) et le signal représentatif de la tension de couple de consigne (uq) et à transformer ces signaux en une information représentative d'une tension de consigne (ua, ub, uc, uα) à appliquer au convertisseur (20) côté

alternatif, l'unité de modulation en largeur d'impulsion (60) recevant en entrée cette information.

11. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 1 à 10, dans lequel lorsqu'il est multiphasé, le courant injecté dans le convertisseur correspond aux courants de phase (ia, ib, ic) et la tension appliquée au convertisseur correspond aux tensions entre phases (ua, ub, uc).

12. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 9 à 11, dans lequel le signal représentatif du courant de flux de référence (idref) est forcé à zéro.

13. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 9 à 12, dans lequel l'unité d'inhibition (51) est destinée à recevoir en entrée l'information représentative de la position du rotor (θ) du générateur synchrone et l'information représentative du courant de couple (iq) et à produire un signal d'inhibition pour l'unité de modulation en largeur d'impulsion (60) uniquement lorsque le courant injecté dans le convertisseur (ia, ib, ic) a atteint sensiblement 90% du courant nominal du convertisseur.

14. Convertisseur alternatif-continu selon l'une des revendications 1 à **13**, comportant en outre un filtre RC (28) par cellule (22.1, 32.1) ayant une extrémité reliée à la borne milieu (A) et l'autre

extrémité destinée à être portée à un potentiel flottant.

15. Chaîne de conversion d'énergie comportant un générateur synchrone à aimant permanents (1) couplé à un convertisseur alternatif-continu (20) selon l'une des revendications 1 à 14, le générateur synchrone étant destiné à débiter dans le convertisseur alternatif-continu.

16. Chaîne de conversion d'énergie selon la revendication 15, caractérisée en ce qu'elle est de type aérogénérateur ou hydrogénérateur.

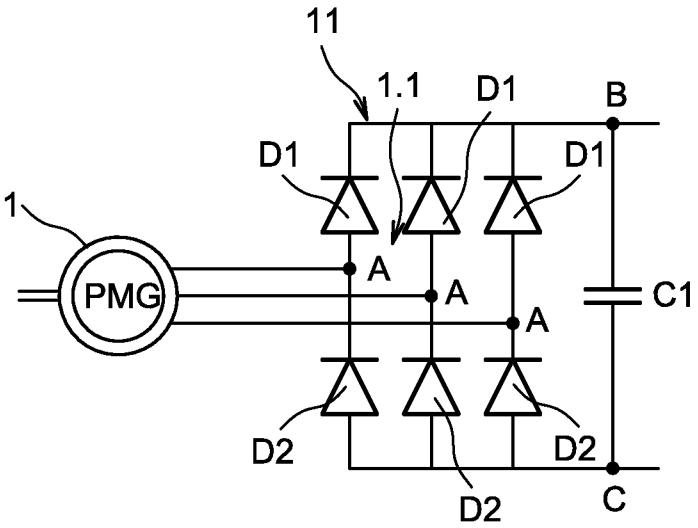
11
1.1
D1
B
D1
D1
1
PMG
A
A
A
C1
D2
D2
D2
C

FIG. 1A

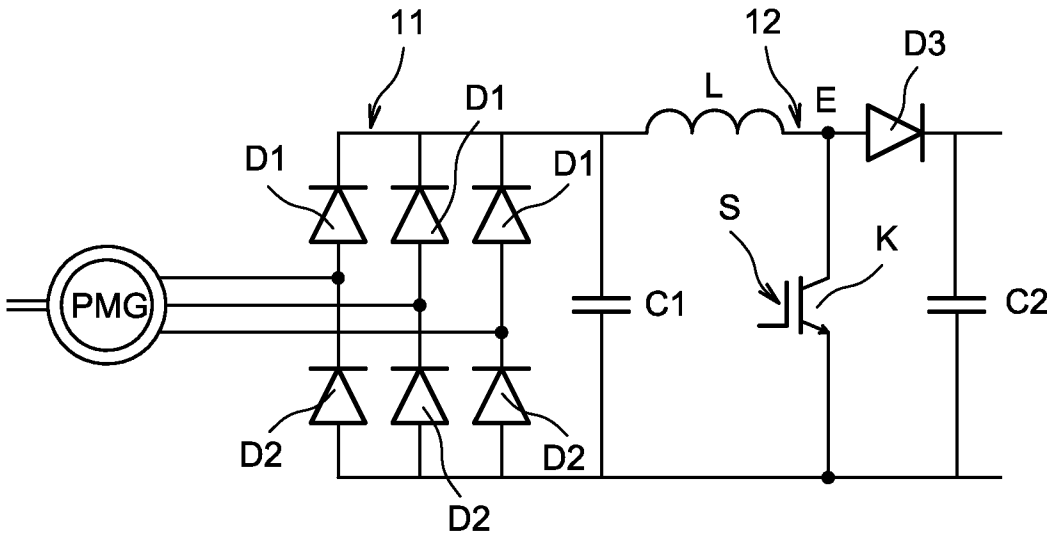
11
12
D3
L
E
D1
D1
D1
S
K
PMG
C1
C2
D2
D2
D2

FIG. 1B

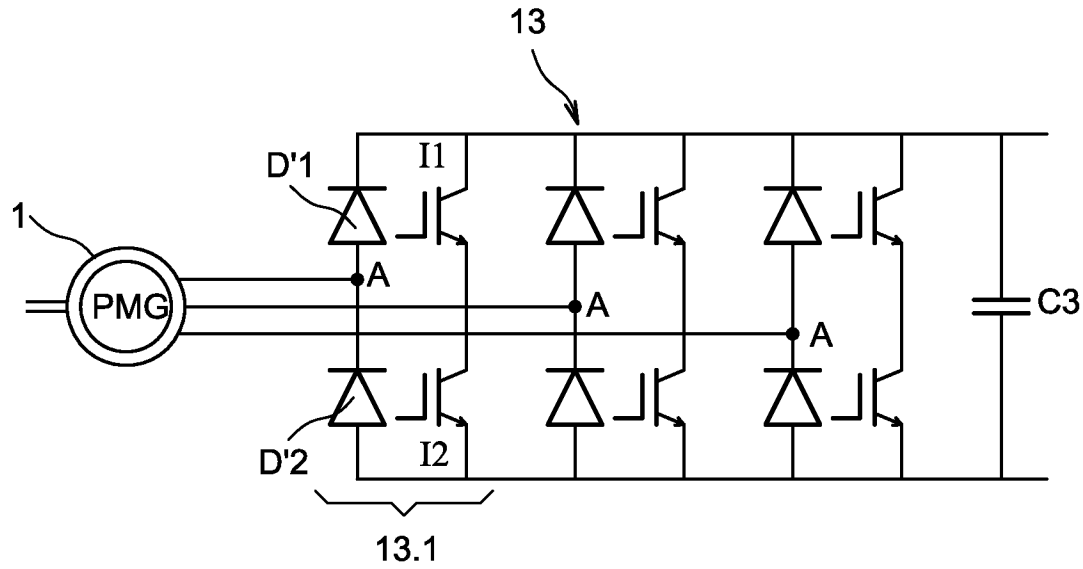

FIG. 1C

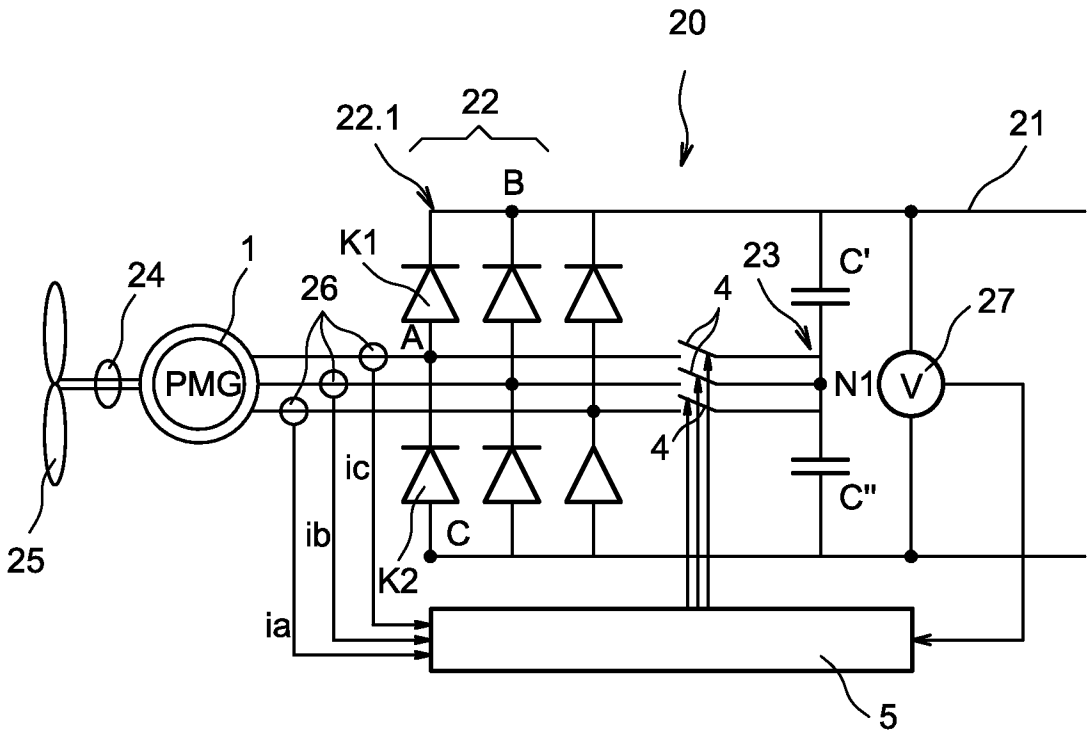

FIG. 2A1

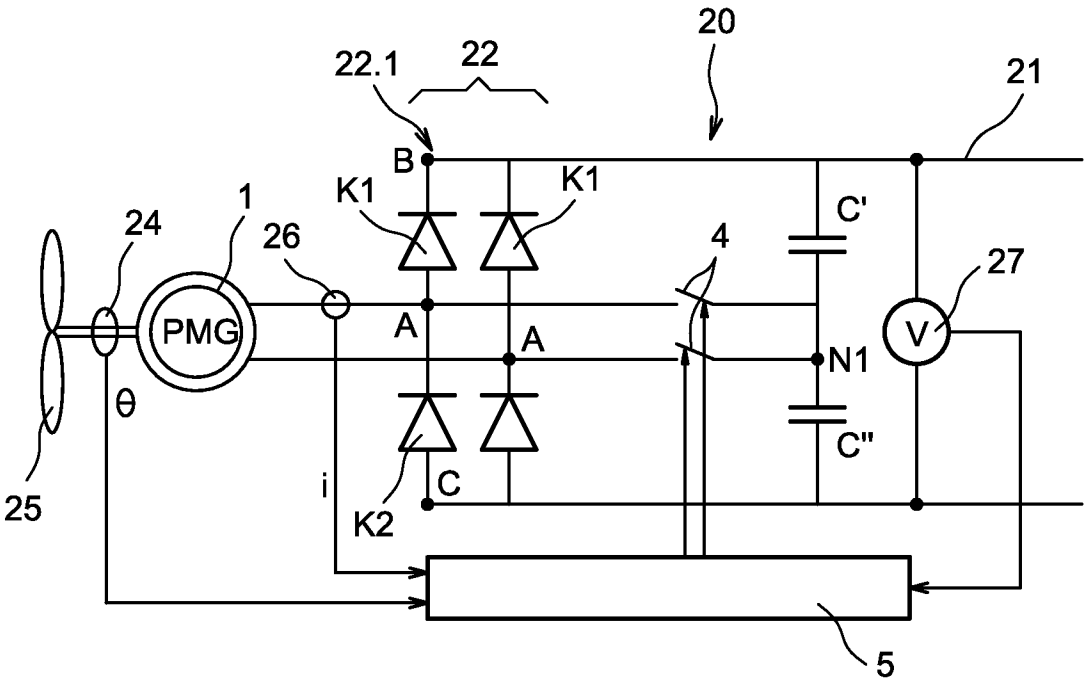

FIG. 2A2

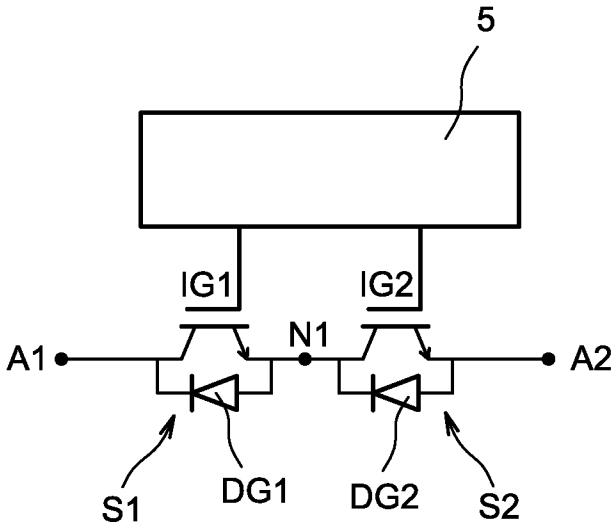

FIG. 3B

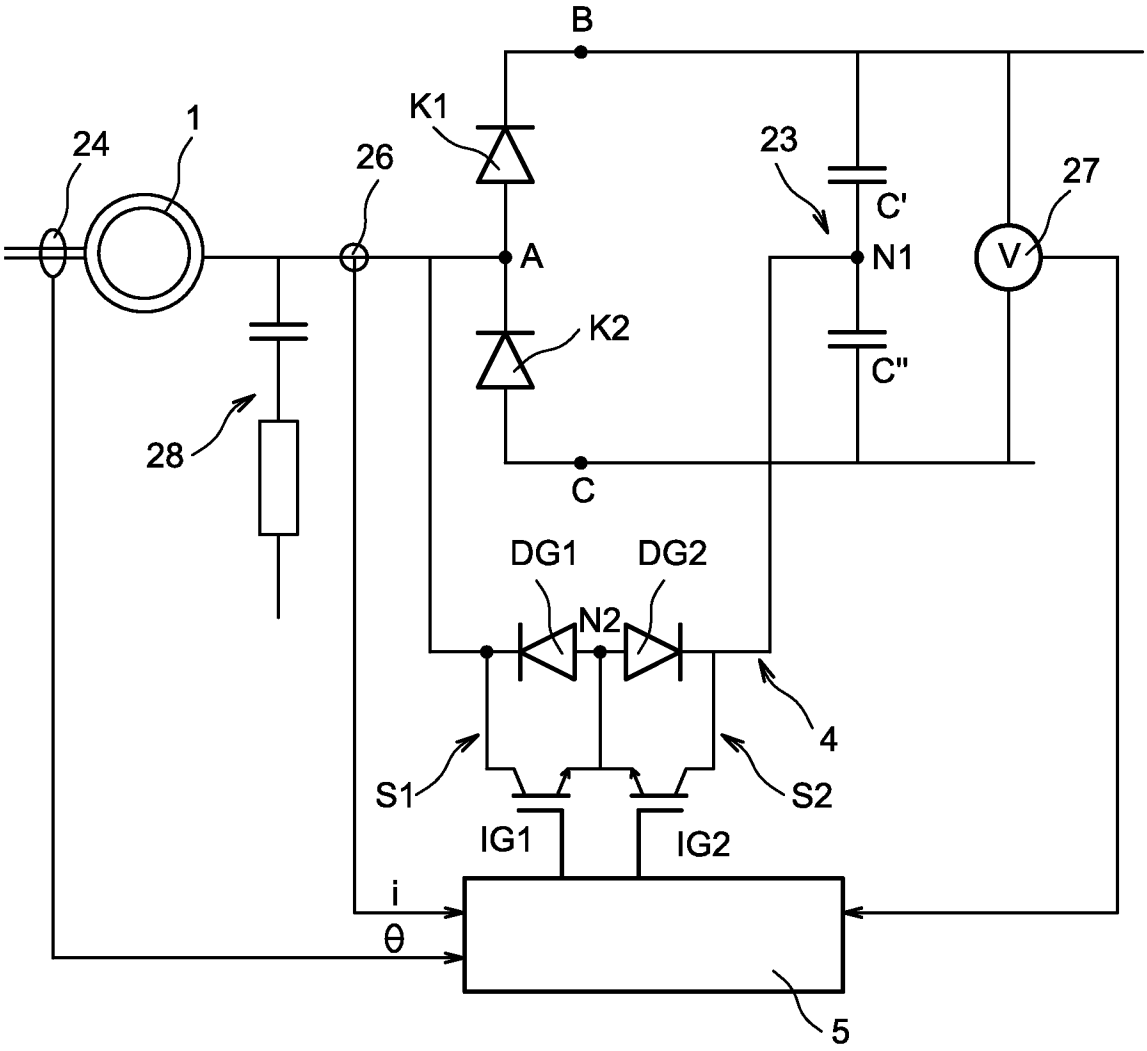

FIG. 2B

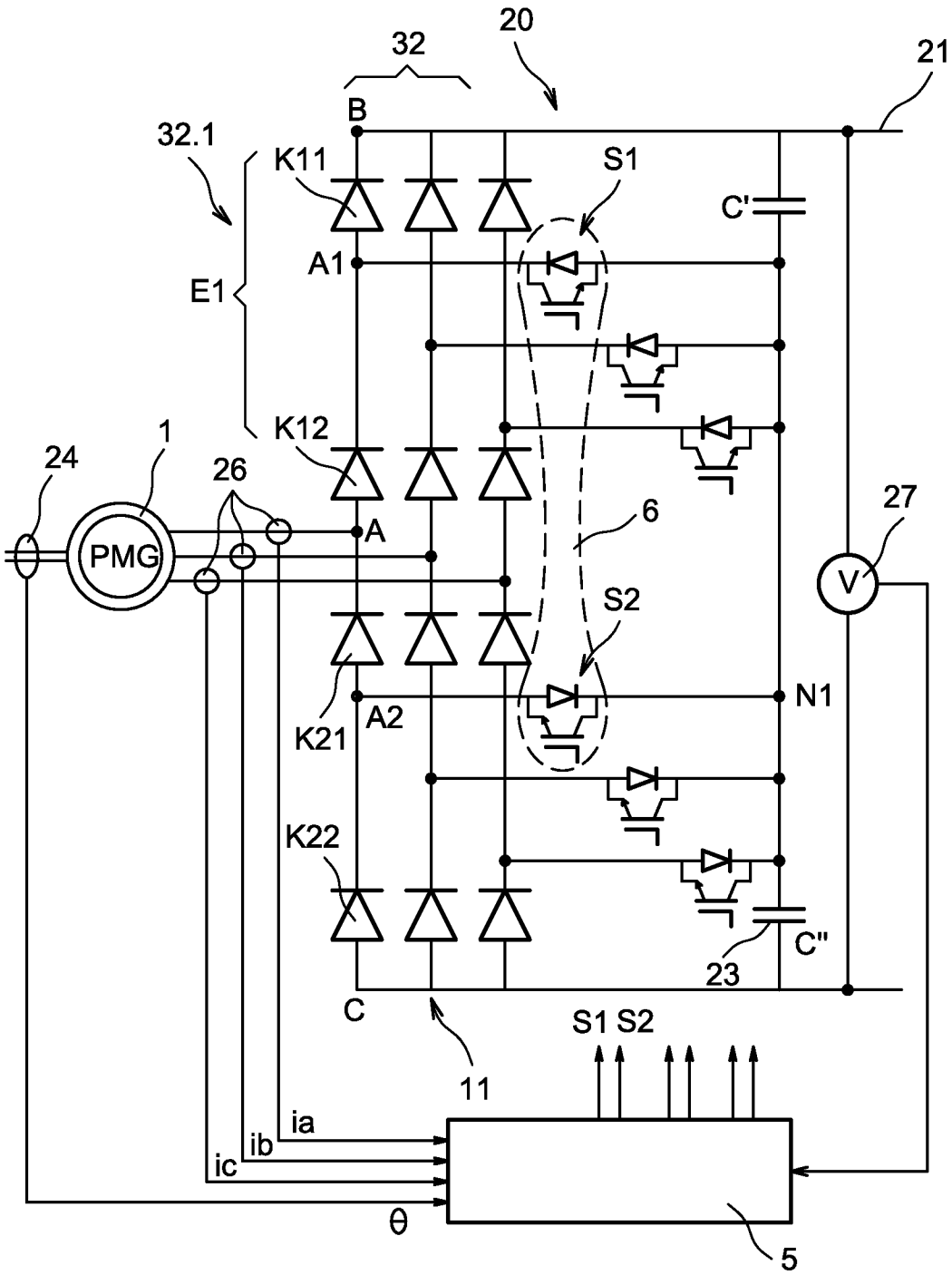
20
32
21
B
32.1
K11
S1
C'
A1
E1
K12
24
1
26
PMG
A
6
27
V
S2
N1
K21
A2
K22
C"
23
C
11
S1 S2
ia
ib
ic
θ
5

FIG. 3A

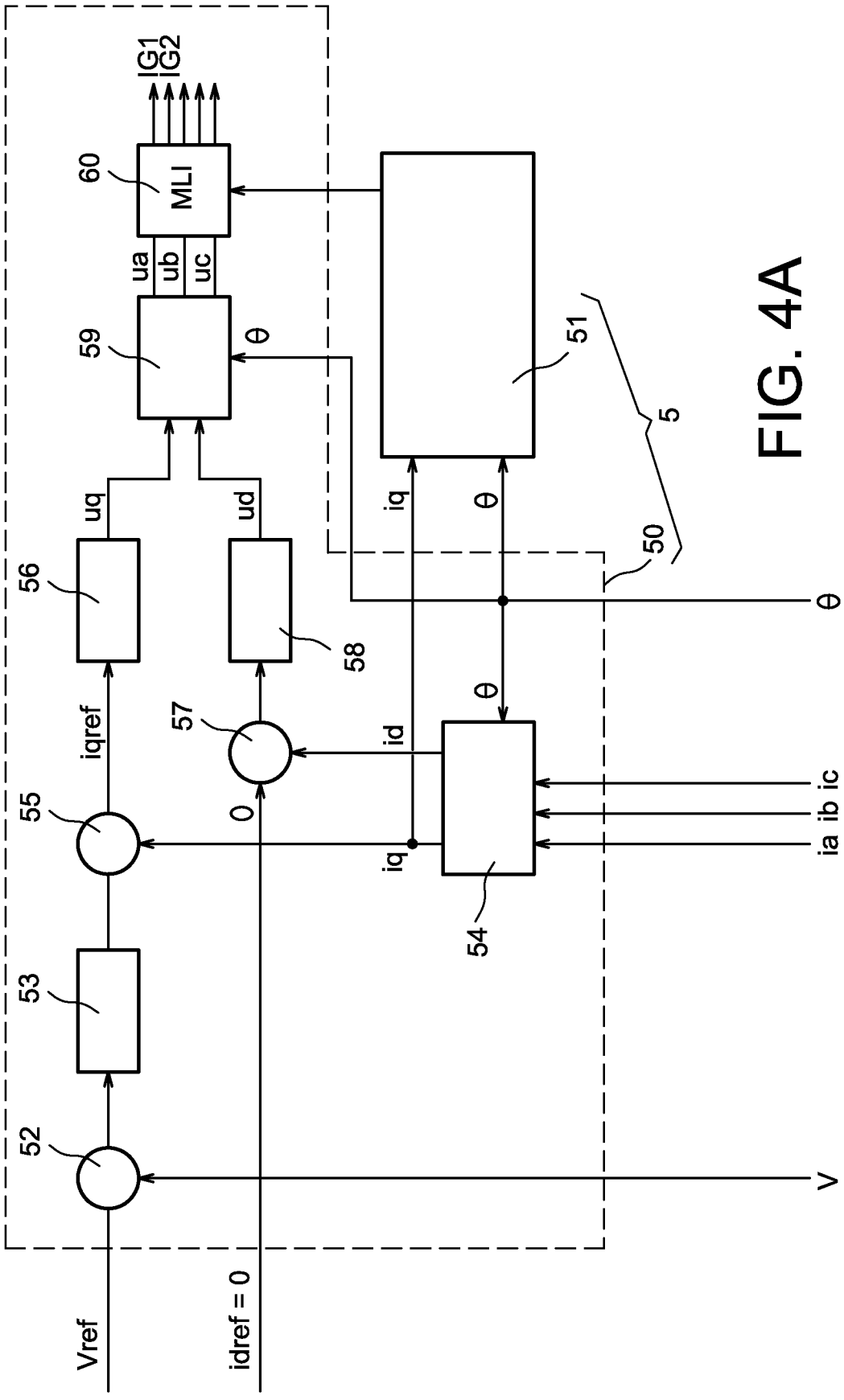
IG1
IG2
60
MLI
ua
ub
uc
59
θ
51
5
50
iq
θ
uq
ud
56
58
θ
57
id
iqref
55
0
iq
54
ia ib ic
53
52
V
Vref
idref = 0

FIG. 4A

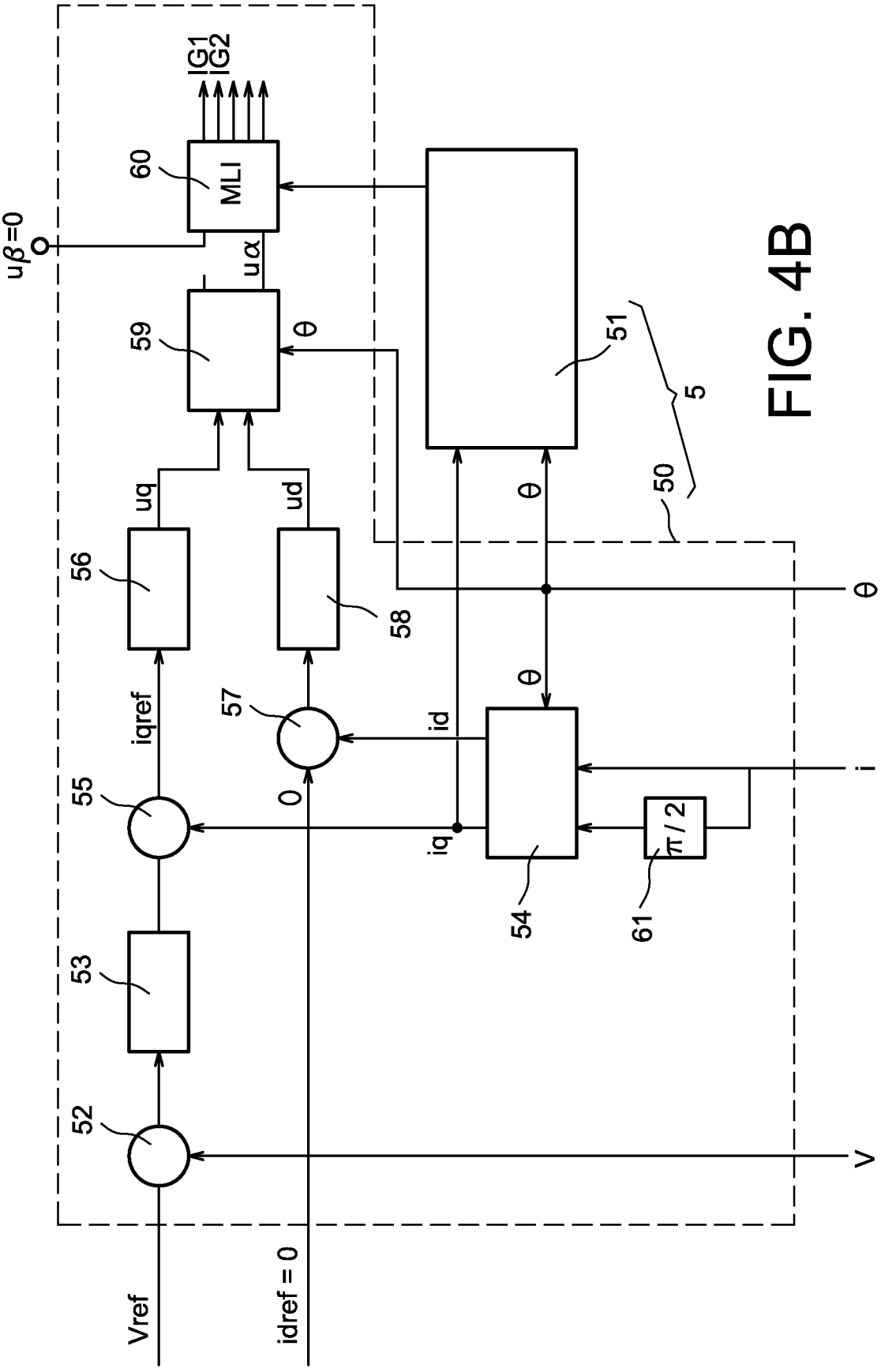
IG1
IG2
60
MLI
uβ=0
uα
59
θ
51
5
50
uq
ud
θ
56
58
θ
iqref
57
id
i
55
0
iq
π / 2
54
61
53
52
V
Vref
idref = 0

FIG. 4B

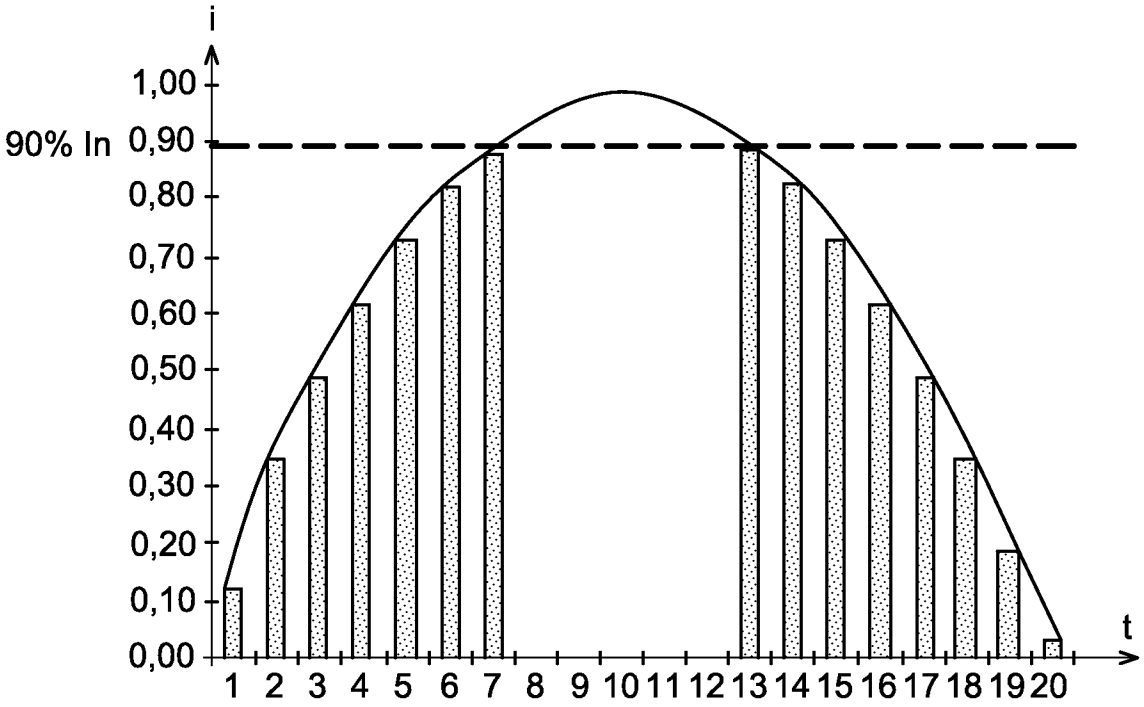
i
1,00
90% In 0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
t
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

FIG. 5A

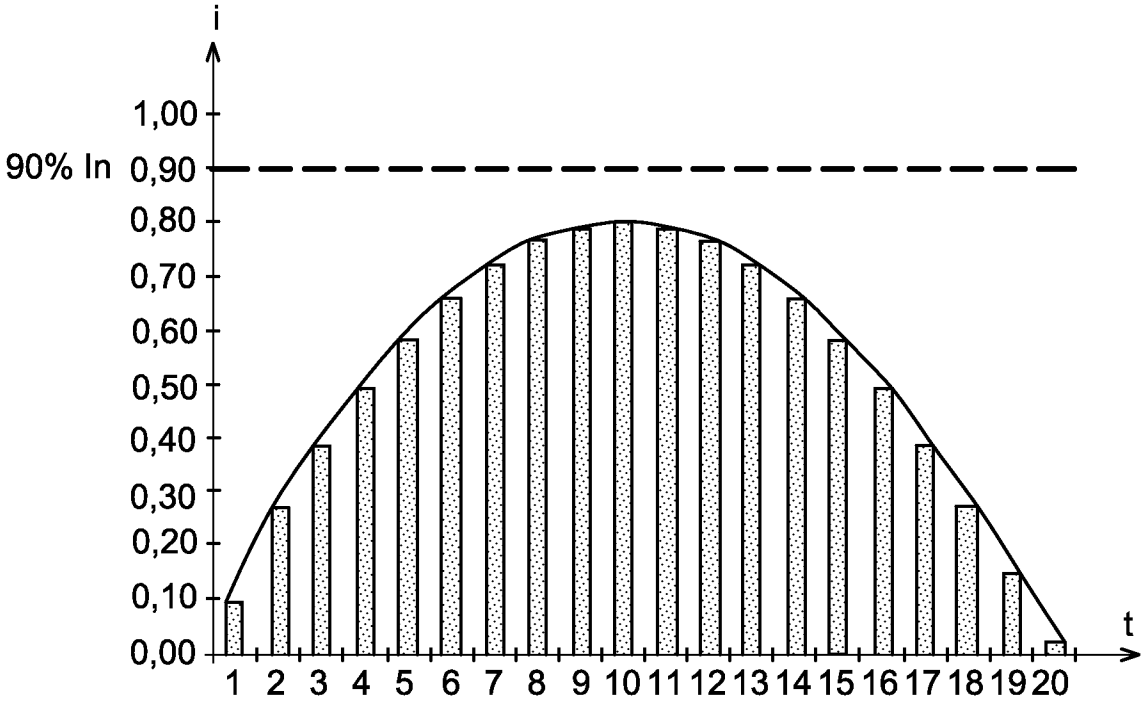
i
1,00
90% In 0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
t
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

FIG. 5B

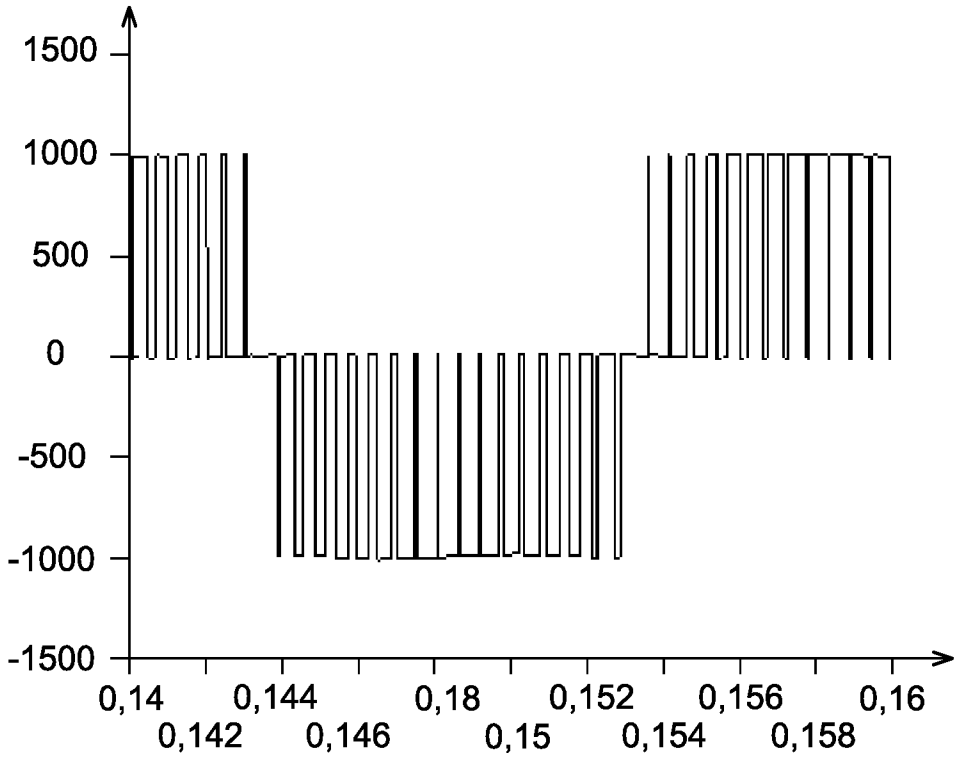
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
0,14
0,142
0,144
0,146
0,18
0,15
0,152
0,154
0,156
0,158
0,16

FIG. 5C

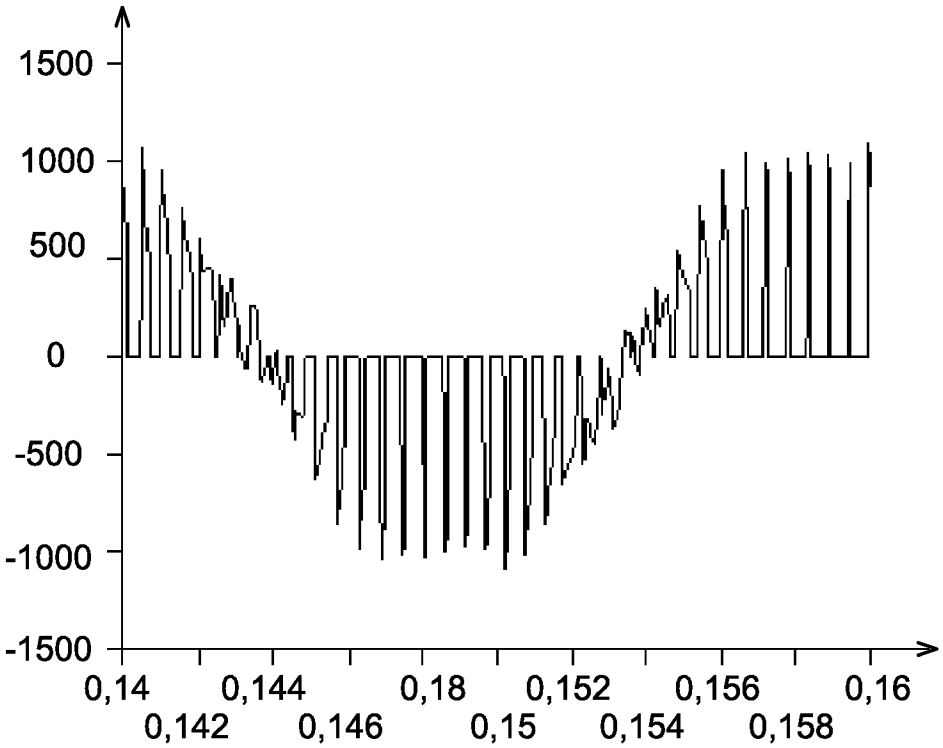
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
0,14
0,142
0,144
0,146
0,18
0,15
0,152
0,154
0,156
0,158
0,16

FIG. 5D